水路部研究報告　第18号　昭和58年３月
REPORT OF HYDROGRAPHIC RESEARCHES , No. 18, March, 1983

精密時刻装置の開発

小野房吉*

DEVELOPMENT OF PRECISE TIME DEVICE

Fusakichi Ono*

Received 1982 September 20

Abstract

A time device, since such a unit did not exist, has been newly developed with the ability to permit exact synchronization of the times of two clocks installed at very remote sites to $\pm 0.1\mu s$.

The conventional time device has a weak point in relation to the difficulty of defining the delays of signals in the whole receiving system including the cycle correction of sampling points in comparison with clocks using Loran C waves.

In a clock comparison based on the developed time device, a Loran C pseudo signal which has a fixed relation to the clock signal is generated at the receiving station, to the clocks are indirectly compared with each other through the generated signal by an ordinary hyperbolic navigation receiver. Therefore, the signal delays in the receiving system are cancelled since the two signals to be compared pass through the same receiving system and thus the possibility of error does not exist.

To check the accuracy of the developed time device, the time of the related new device concerned was set to "UTC" based on the writer's method and the time set point was compared three times with one of UTC-TAO (Tokyo Astronomical Observatory). As a result, it was verified that the desired setting accuracy of $\pm 0.1\mu s$ was satisfactorily cleared.

This time device was fabricated for international co-observation based on laser geodetic servey of the laser geodetic satellite "LAGEOS" by which the Maritime Safety Agency originally started to prove the relationship between the local and world geodetic systems since 1982. Currently, the time device is performing in a stable manner at the Shimosato Hydrographic Observatory.

Key words: Time determination, Time comparison of Loran C wave, International Clock comparison.

* 海洋研究室　Marine Research Laboratory

1．まえがき

この時刻装置は，昭和56年度に日本測地系と世界測地系の関係を明らかにする目的で，海上保安庁の下里水路観測所に設置された，測地衛星観測用レーザ測距装置の，運用に必要な世界時を供給するために開発した．レーザ測距装置本体は米国製であるが，時刻装置は既存の米国製では，任意地点における高確度な時刻の再設定に運搬原子時計による往復測定を必要とし容易でなかったからである．

原子周波数標準を用いた時計は，単位時間の繰り返し間隔が一様であると言う点では，勝れた時刻装置と云える．しかし，繰り返し間隔が一様なだけでは精密な時刻装置とは云えない．精密な時刻装置は時間間隔が一様なだけではなく，指示する時刻が準拠する時刻系に対して，正確に設定できるものでなければならない．従来の時刻装置はこの点で不満であった．

今回開発した時刻装置は，ルビジウム（Rb）原子周波数標準器を原振とし，0.1μs（マイクロ秒）単位で任意に時刻設定が可能な時計部，航行援助システムのロランCを利用する時計比較部，エレクトロニックカウンタ等から構成され，ロランC電波の地表波が利用できるあらゆる地域で準拠する時刻系（協定世界時UTC）と一定の関係にあるロランC発射時に対して±0.1μsの精度で時刻設定が可能である．

これは，従来のように受信点の比較基準に対するロランC電波到来時を直接測定する方法ではなく，受信点の比較基準と一定の関係でロランC擬似信号を発生させ，この発生信号を仲介にして比較基準とロランC電波到来時の時間差を双曲線航法受信機で測定する間接法の採用で可能になった．この方法では比較される二つの信号が同じ受信系を通過するため，信号の遅延補正に伴う誤差が原理的に介入しないからである．

本装置の時刻設定精度を確認するため，装置を所定の位置に設置し，ロランC電波を仲介にして，示す時刻をUTC（IWO）に設定し，この時刻と東京大学東京天文台（TAO）が保持するUTC（TAO）と3回にわたって時計比較を実施した．各回の比較は，それぞれ場所も替え，利用局も替えた独立のもので，採用した測地定数，測地線の距離，電波伝搬時間の計算式，陸上伝搬補正定数等が不適当であれば，その影響が結果に反映するはずであった．しかし，測定結果は3回とも整合性のある値を示し，採用した諸定数，諸式が必要な精度で正しく，装置の開発目標精度±0.1μsは十分確保されていることがわかった．

2．時計の示す時刻の準拠時刻系への整合

秒程度の精度であれば，ラジオ，テレビの時報等を参照して，いつでも誰でも簡単に時刻合せをすることができる．しかし，千分の一秒を超え，百万分の一秒ともなると，時刻合せもそう簡単ではない．基準としてラジオ，テレビの時報では不足するし，主として時報を目的とした短波の標準電波でさえも利用に耐えなくなる．このような場合に利用されるのが，目的外の利用であるが，無線航行援助システムのロランCである．

ロランCは搬送周波数100KHzの本来双曲線航法のための，パルス方式航行援助システムであるが，時刻の基準としても利用できるよう発射パルスの一つ一つが，米国海軍天文台（USNO）が保時するUTCに対して一定の関係で発射されている．一定のフォーマット，一定の繰り返しのパルス電波であり，しかも長波であるから，地表波の遠達性にすぐれ，受信波の位相安定度が極めて高い．繰り返し間隔の基準は，安定度の高いセシウム（Cs）原子周波数標準器によっていて，時間間隔の基準としても申し分がない．このシステムは一つの主局に対し，これと一定の関係の電波を発射する複数の従局によって構成され，そのどれもが，時刻の基準となり得る．通常，この電波の相対到来時間差の測定精度は±0.1μsである．従って時刻の絶対値においても，適切な利用法によれば，同程度の精度が期待できる．

受信点の時計の示す時刻を準拠時刻系に整合させると言うことは，一次的にはロランC発射時に同期又は，こ

れとの関係が正確に分かればよい．そのため，一般に測定される電波の到来時には，電波伝搬時間，受信アンテナ，接続ケーブル，受信機内での信号遅延が正確に評価され補正される必要がある．つまり，この程度の精度になると，時計そのものの精度が良いことは勿論，時刻を合わせるための比較原理，比較装置の性能が重要である．

従来の時計比較原理では，受信アンテナ，比較ポイントのサイクル改正を含めた受信機内での信号遅延量の確定にあたって，原理的な不確定要素を取り去ることができなかった．

3．比較原理

従来の時計比較の問題点は，受信系全体の遅延のうち特に，搬送波の0.5又は1.0サイクル単位で起るサイクル誤差であった．これが発生すると，時計比較精度はそれだけで±5～10μsに低下するから，それ自身単独での高精度時計比較は困難で，絶対値の確定にあたって，他の手段（運搬原子時計）の助けを必要とした．この開発では，以上のような欠点に鑑み，受信系の遅延補正を必要としない相対比較原理を採用し，補正に伴う誤差の介入を原理的に解消した．

第1図に，従来の時計比較におけるタイミングチャートを示した．(1)は主局時計の基準パルス，(2)はこれと同期して発射されるロランCパルス，(3)はロランC電波の受信点での到来波，(4)はこれを受信機で受信して再現された波形，(5)は受信点の時計の比較基準パルスである．このパルスをロランC電波を仲介にして(1)のパルスに同期させたい．τ_Mは送受信点の測地位置を与えると計算できる電波伝搬時間，δは受信系の遅延，Cは受信波の立上がりから，比較ポイントまでのサイクル改正量，TDが時計比較値である。

この方法で時計比較結果$\Delta T(=P_2-P_1)$は，

$$\Delta T = TD - \tau_M - \delta - C + \text{USNO Corr.}$$

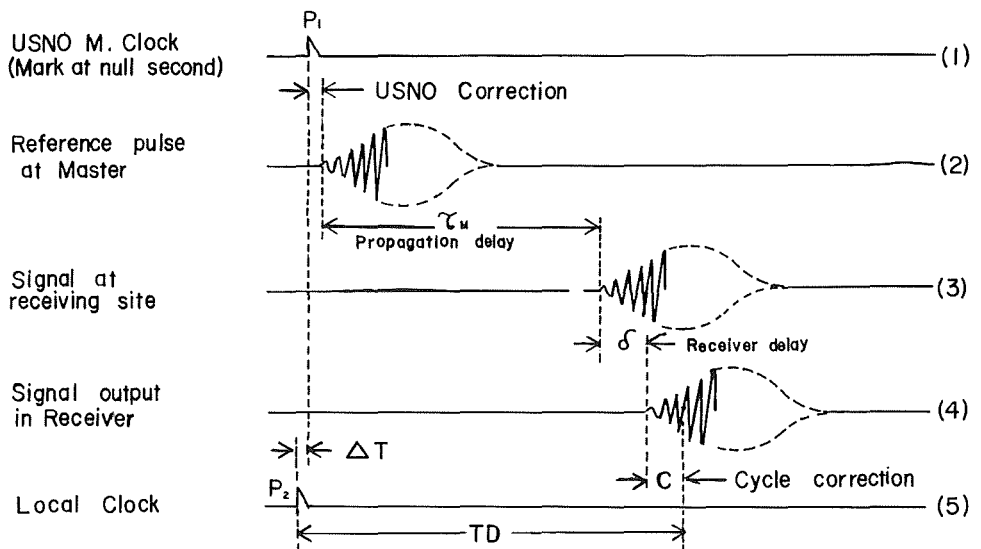



Figure 1 Timing chart of conventional type time comparison system

右辺のτ_Mは，あらかじめ計算される量で，0.1μs以上の誤差の介入する余地はない．δは細かく見れば，一定ではなく，受信機の使用環境の温度変化によって変動し±0.2μsぐらいは見込まねばならない．Cは立上がりがはっきりしない以上確定しようもなく，サイクル誤差が起り得る．半サイクル誤差の可能性は，受信アンテナにループアンテナを用いている場合は，設置方向，マッチングトランスの極性，さらに受信機内に高周波結合トランスを用いている場合はその極性等の配線ミスによって起り得る．

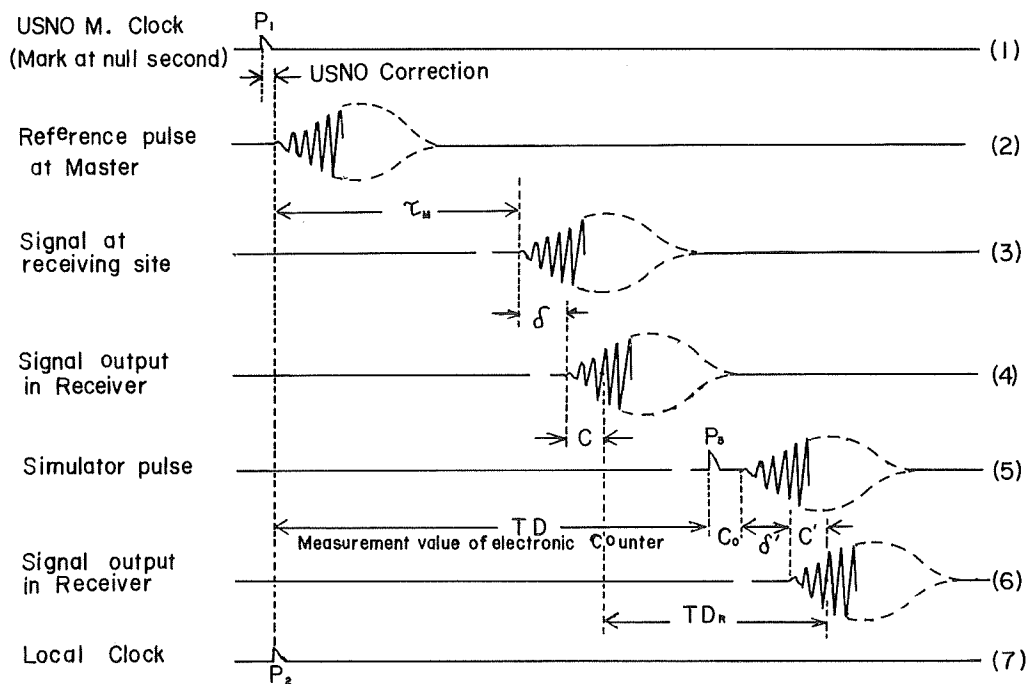



Figure 2 Timing chart of new type time comparison system

第2図は今回の比較タイミングチャートである．第1図と異なるところは，(5)のロランC擬似信号が追加されたこと，測定値が TD，TD_R の二つとなったことである．ロランC擬似信号は，(7)の時計と同じ標準発振器の信号を受けて動作するシミュレータで作っている．シミュレータの参照パルス P_3 と，擬似信号の立上がりとの時間差 C_0 は，設計値として与えられる既知の一定値である。ロランC擬似信号のフォーマットは本来のロランCシステム従局信号波形と全く同じとし，この電波は受信アンテナと同じ形式のアンテナで，受信アンテナの至近距離から微弱電波として発射するものとする．

そこで，所定にセットされた一般の双曲線航法用受信機で，電波を受信すると，受信機は本来のロランC主局電波の到来時から，擬似信号までの時間差 TD_R を測定する．一方シミュレータの参照パルス P_3 と受信点の基準パルス P_2 の時間差 TD をエレクトロニックカウンタで測定する．この結果から時計比較値 ΔT は，

$$\Delta T = TD-(\tau_M+\delta+C+TD_R-C'-\delta'-C_0)+USNO\ Corr. \quad (2)$$

ここで，比較される二つのロランC信号は，同じ受信系を通過するから $\delta=\delta'$，$C=C'$．したがって，

$$\Delta T = TD-\tau_M-TD_R+C_0+USNO\ Corr. \quad (3)$$

となり，受信機の遅延補正は不要であることがわかる．P_2 の P_1 への同期は，この式の ΔT がゼロになるように P_2 の位相を前後させればよい．

比較される二つの信号の比較ポイントが異なればサイクル誤差となるが，現在市販されている一般の双曲線航法用受信機の信頼性は著しく高まっており，一定レベル以上で受信される信号に対して，誤差を起こすことは程んどない．万一サイクル誤差を起している場合でも確認の方法はある．主局に対する従局信号の時間差が従局の全部について同時取得されるから，この全データにつき，受信点の測地位置を与えて（測定値O－計算値C）を計算し，この大小でサイクル誤差が判断できる．（O－C）は一般にはゼロ又はこれに近い数値となるべきだが

らである．電波伝搬経路に陸上部分が含まれると100km当り0.6〜0.9μsぐらい増加するから，海図上から陸上部分の概略を調べ，この増分も考慮して（O－C）を計算する．又受信機のサイクル誤差は，実際の電波を用いなくても，ロランCシミュレータを用いて，受信レベル，雑音レベル，空間波の混入等種々の条件のもとで信頼性が確認できる．本装置では，このようなサイクル誤差の確認もスイッチ操作一つで随時できる構成となっている．

4．時刻装置の構成及び諸元

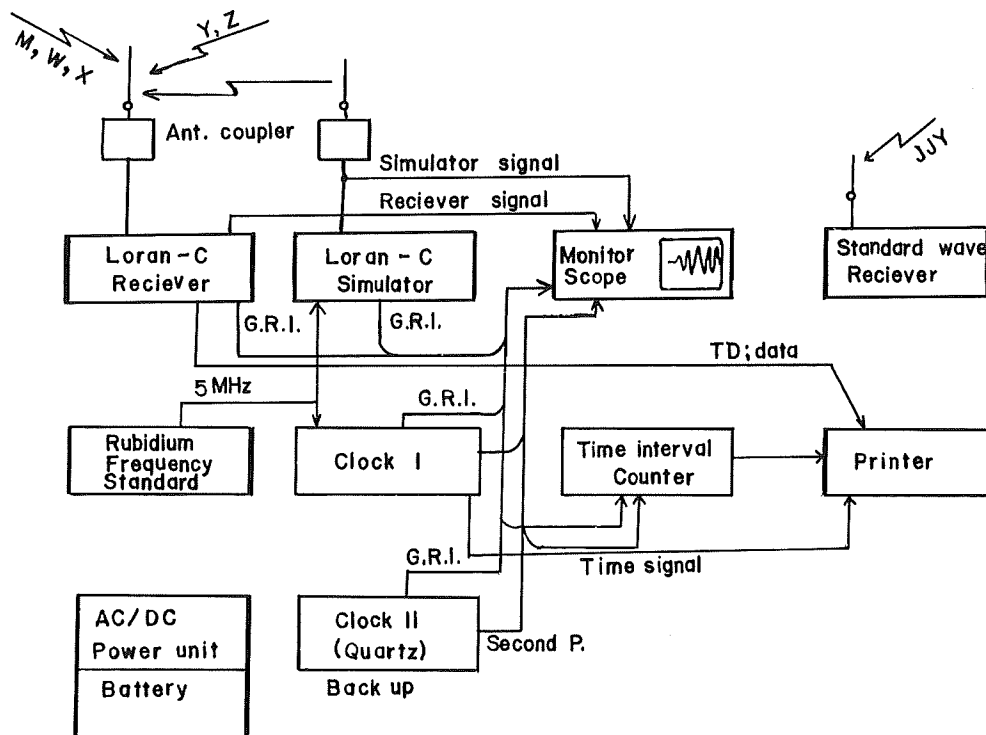



Figure 3 Block diagram of a Clock and Clock comparison system

(1) 周波数標準器 Rb周波数標準器 NEATOMIC Rb－1007H 日本電気㈱製

周波数	10MHz，5MHz，1MHz，100 kHz，出力インピーダンス75Ω
安定度	長期 1×10^{-11}/月，短期 2×10^{-11}/秒 rms
温度特性	-0.4×10^{-10}/℃（周囲温度50℃） $+0.7\times10^{-10}$/℃（周囲温度0℃）
電源電圧変化	$<\pm1\times10^{-11}$（規格電圧±10%）
設置方向変化	$<\pm1\times10^{-11}$（東西南北360°回転）
立上がり特性	$<\pm1\times10^{-10}$（電源投入後30分25℃）
周波数調整範囲	$\pm1.3\times10^{-9}$（C－FIELD ダイヤル，目盛0〜1000）
停電時動作時間	10分間以上（48時間充電後）
消費電力	<70W

(2) デジタル時計 KPM－3910 国際電子工業㈱製

外部入力　10MHz・5MHz

基準周波数出力　5MHz，1Vrms　50Ω×2，TTL300Ω Load

1MHz，TTL

基準秒信号出力　5VPP，50Ω　パルス巾1ms

遅延秒信号出力　TTL　並列3系統　0.1μs〜999999.9μs（0.1μsステップ連続可変）

リセット　外部入力による自動又は手動

ロランC比較基準　GRI　200μs〜99900μs，パルス巾100μs，TTL，自動・手動リセット可

消費電力　AC100V　32VA，DC24V　17W

(3)　ロランC擬似信号発生器　LRS−128　㈱光電製作所製

繰り返し周期　40000μs〜99800μs

信号発生局数　主局1，従局2（Slave1，Slave2）

時間差（LOP）　13000.1μs〜86800.0μs（2従局について独立）

出力レベル　1mv rms〜1V rms（ATT. 10dbステップ），出力インピーダンス75Ω

雑音の混入　各局信号に独立に可能，レベル変化も可

空間波の混入　各局独立，レベル変化可，30μs〜200μs遅延が与えられる

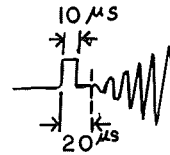
ブリンク信号　2従局の信号に混入可能

速　度　主局，従局とも独立に1〜9μs/分の位相速度が与えられる

トリガパルス　主局，従局共にTTLレベル，パルス巾10μs

トリガ位置　主局，従局共に第1パルスの前20μs

外部入力　5MHz

消費電力　AC100V 20VA

(4)　ロランC受信機　LR707D　㈱光電製作所製

追尾従局数　4局（2局並列表示，全局3秒間シリアル表示）

測定分解能　0.1μs

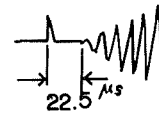
ノッチフィルタ　デッカ用固定3個，可変1個（ATT. 30db以上）

GRIパルス　TTL，パルス巾13.5μs

GRIパルス位置　主局受信信号の前22.5μs

受信アンテナ　ホイップ　4m

使用温度範囲　0°〜50℃

消費電力　AC100V　50VA

(5)　エレクトロニックカウンタ　KDM 3980　国際電子工業㈱製

外部入力　5MHz　TTL

測定分解能　0.1μs

積算回数　1，10，100，1000，10000

（このカウンタはユニバーサルカウンタをそのまま利用しており，それなりの機能を有しているが，ここでは，時計，ロランCGRI，シミュレータGRI，ロランC受信機GRIから出力されるトリガ信号相互間の時間差が，切替えによってすべての組合せで実行できるように構成している）

以上，構成装置の大部分は，既製品で賄ったが，時計部及びデータ集録のためのインターフェースは新らたに

設計製作した．従来のものでは時刻が0.1μsまで任意に設定でき，同時にロランC比較基準パルスのある時計がなかったからである．

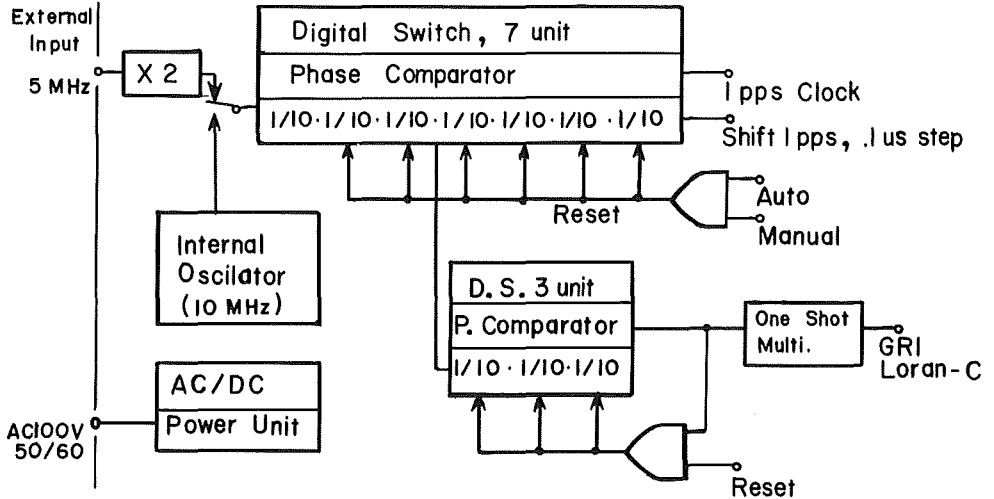



Figure 4 Block diagram of the Clock Device

時計装置の構成を第4図に示した．5 MHzの入力を2逓倍して0.1μsのクロックパルスを作り，これを10進7段のカウンタ用ICで積算して1秒のクロックパルスを得ている．ICの各段からは符号化BCD信号が出力されており，この信号をデジタルスイッチと位相選択回路で選択し，基準の秒信号に対して0.1μs～999999.9μsまで任意にステップ調整ができる遅延秒信号出力がある．ロランCを仲介とする時計比較のために，位相選択回路の3段目から10KPPSの出力を受けて動作するプリセットカウンタで，ロランC比較基準用GRIパルスを作っている．このパルスと，移相秒信号とは0.1μsから100μsまでの細かい桁が共通であるから，ロランCを仲介とする時計比較が，ロランC信号に整合させれば秒信号も同時に整合してしまうと言う時刻同期調整に便利な構成とした．

ロランC擬似信号発生器は，市販のロランC受信機の性能テスト，教育訓練用のものであり，本来のロランCシステムの発射電波と同じタイムシーケンスで，全く同じ波形の擬似信号が，主局及び二つの従局について発生でき，それぞれの信号には独立に所定の位相ドリフト，雑音，空間波の混入ができて受信機のあらゆる性能テストが可能である．

ロランC受信機は市販品をそのまま採用した．市販品は不特定多数のユーザを対象に大量生産されるものであるから性能が安定していて，使い勝手がよく，安価であることがよい．実際この受信機は，シミュレータによる，種々の条件でのテストの結果指定された比較ポイントの検出能力が高く，スイッチのオンオフによる再現性テストで良好な結果を示した．測定分解能も問題がなく，実用テストでは，送受信点間の距離が2000kmを超えてもなお安定に地表波を自動補捉し，終日追尾した．さらにこの受信機では，一つの主局と，4つの従局を自動追尾し，受信点の測地位置が分からなくても時刻比較が可能であるし，測地位置が分かっている場合は，4つの取得データについて（O－C）を計算することで，陸上伝搬補正値が評価できるなどの特長がある．

5．時刻の設定

(1) 時刻の概略設定

ロランC電波は，一定のフォーマットの繰り返しパルスであるが，これには時刻マークは挿入されていないから，これのみで時，分，秒等の時刻を設定することはできない．そこでこれの利用は，利用に先だって当該時計の示す時刻が他の何らかの方法でUTCに対して百分の一秒程度に概略設定されていることが必要である．通常千分の一秒までの概略設定は，報時を目的とした短波の標準電波があるのでこの利用が有効であり，我々もこれを利用した．

(2) 時刻の精密設定

ロランC電波は，米国のUTC（USNO）に対して，一定の同期関係で発射されており，UTCの毎秒の直後に発射される主局パルスの位相が，あらかじめ公表される予報表から計算できるのでこれを利用して時刻の精密設定を行なう．従局電波を利用してもよいが，その場合はその局のED（Emission Delay）を補正する．

第2図について具体的に説明する．ロランCシミュレータの繰り返し周期を当該利用電波と同じに設定し，従局1又は2の電波を発射する．このときの発射波が本来の主局到来電波に対して適当な時間差の範囲にあれば，受信機は主局電波の到来時から，シミュレータ電波の到来時までの時間差TD_Rを測定する．一方時計から出力されるロランC比較パルスから，シミュレータの当該従局パルスに対応する比較基準パルスまでの時間差TDを測定する．こうしてTD，TD_Rが測定されれば(3)式が計算できるから，このΔTがゼロすなわち，

$$TD = \tau_M + TD_R - C_0$$

になるように時計の比較基準パルスの位相を調整する．

この調整は，先に下3桁（0.1～99.9μs）を秒信号遅延用デジタルスイッチで，次に100μs以上の桁をGRI設定用のデジタルスイッチで行なう．これで，時計の遅延秒信号及びGRIパルスが共にロランC発射時に同期する．次に同期の正しさを確認するため，遅延秒パルスから，時計のロランC比較基準用GRIパルスまでの時間差TD_0を特定の時刻に対して測定し，その測定値がUSNOの発表する予報値TD_Cと一致することの照合を行なう．この照合において，$TD_0 = TD_C$であれば，時計の示す時刻は正しくセットされたのであり，$TC_0 \neq TD_C$であれば，その差分だけ偏差をもって設定されたので再調整する．$TD_0 - TD_C > 0$では進み，$TD_0 - TD_C < 0$では遅れである．

(3) サイクル誤差の同定

時刻設定以前の問題として，受信機が時間差の測定においてサイクル誤差を起してないことを確認する必要がある．この方法では受信機のスイッチを投入すれば，程なく自動的に信号を補捉し，4つの従局の時間差データを測定表示する．一応測定値が安定したところで，同期をはずし信号の再補捉を行わせ，このときの時間差測定データが，先の測定値を再現していれば，サイクル誤差は生じていないと見てよいが，念のため受信点の測地位置を与えて（O－C）を計算してみる．（O－C）は理想的にはゼロとなるべきであるが，電波の伝搬経路に陸上部分があったり，空間波が受信されればそれなりの値を示すから，これらも考慮してサイクル誤差の有無を判断する．

受信機の比較ポイントは，受信波の立上がりから3サイクル目の終りのゼロクロスを自動的にサーチするように設計されていて，この動作はかなり信頼性の高いものであるが，ときにはこの点が1サイクルずれることは考えられる．しかし，ずれるとしてもこのずれは通常特定の一局についてのみ生ずることは考えられず，起るとすれば全局について共通に生ずるから，この方式ではキャンセルされ原理的に誤差の原因とならない．

6．時計比較

この時刻装置の時刻設定法は，新しい方法なので製作された装置が,期待どうり機能することを確認するため東

京大学東京天文台（TAO）の協力を得て三回にわたって比較測定を実施した．比較方法は，製作した装置を所定の位置に設置し，短波の標準電波JJYおよびロランC硫黄島局だけを参照して，時計をUTCに設定し，その時刻とTAOが保持するUTC（TAO）との運搬原子時計を仲介とする比較である．

第一回目は海上保安庁水路部（JHD）で昭和56年10月20日に，第二回目は設置場所を替えても同様な設定精度が期待できるかどうかを確認するために水路部から西南西に数百籽米隔った同じく同庁の下里水路観測所(SHO)で昭和57年2月2日に，そして第三回目は，前二回が運搬時計仲介であったが，この方法に問題がないことを確認するために，装置をそっくりTAOに運搬し，UTC（TAO）との直接比較を同年6月17日に実施した．もちろんこのときは，ロランCの受信アンテナは，TAOのAustron2000C型ロランC受信機による受信点と20mと離れない東側に設置した．

その結果三回とも次に示すように，0.1μsまで一致する再現性を示し，今回開発の時刻装置とその時刻設定法が十分信頼できるものであることが分かった．

(1) 第一回時計比較実験 昭和56年10月20日

利用したロランC局	9970M：北西太平洋チェン硫黄島局（LC_{IWO}）
受信点 1	海上保安庁水路部・東京築地（JHD）
受信点 2（TAOの定常観測点）	東京大学東京天文台・東京三鷹市
送受信点間の距離・伝搬時間	（LC_{IWO}－JHD）1213.590km，4051.7μs
	（LC_{IWO}－TAO）1217.673km，4065.3μs

時刻の設定データ（Figure 2参照）

		→	
TD_R（受信機測定値）	80006.3		80006.3
τ（計算電波伝搬時間）	＋4051.7		＋4051.7
δ（陸上伝搬増分）	＋ 0.5		＋ 0.3
C_0（シミュレータ改正）	－ 50.0		－ 20.0
TD（カウンタ測定値）	84008.5μs		84038.3μs

差 29.8

上の計算で正しいTDは右側の84038.3μsのところ，計算に錯誤があり左側の84008.5μsで設定してしまった．そのため時計は29.8μs遅れて設定されたので，比較結果には－29.8μsの補正を行ない，この設定時刻をUTC（JHD）とする．

時計比較結果	UTC（TAO・PC1）－UTC(JHD)	（57.1－29.8）	（5^h30^m UTC）
	UTC（TAO）－UTC(TAO・PC1)	－27.1	
	UTC（TAO）－UTC（JHD）	＋ 0.2μs	

当日のTAOにおけるUTC（TAO）－LC_{IWO}の測定値

UTC（TAO）に対する到来時	4128.4	（TAOの測定）
τ（計算電波伝搬時間）	－4065.3	
δ_1（受信系の全遅延量）	－57.1	
δ_2（陸上伝搬増分）	－0.5	（約60km）
UTC（TAO）－LC_{IWO}	5.2μs	

ここでUTC（JHD）はロランC発射時に同期させたのであるからUTC（LC_{IWO}）でもある．従って，

$$\mathrm{UTC\ (TAO)-UTC\ (JHD)=UTC\ (TAO)-LC_{IWO}}$$

となるべきである．しかるに実際はTAOの測定値とJHDの測定の間で5.0μsの偏差を生じた．これはTAOとJHDの受信系の間に系統差があることを示している．

(2) 第二回時計比較実験　昭和57年2月2日

利用したロランC局　7930M：北西太平洋チェン南鳥島局（LC_{MAR}）

受信点　1　海上保安庁下里水路観測所・和歌山県下里（SHO）

受信点　2　第一回と同じ

送受信点間の距離・伝搬時間　LC_{MAR}－SHO　2034.002km 6791.0μs

LC_{MAR}－TAO　1876.711km 6265.8μs

時刻設定データ

TD_R	58931.0μs
τ	＋6791.0
δ	0.0
C_0	－ 20.0
TD	65702.0μs ← この数値でUTC（SHO）を設定

時計比較結果

UTC（TAOPC１）－UTC（SHO）	30.20μs
UTC（TAO）－UTC（TAOPC１）	－30.27
UTC（TAO）－UTC（SHO）	－ 0.07μs

当日のTAOにおけるUTC（TAO）－UTC（LC_{MAR}）の測定値

UTC（TAO）に対する到来時	6328.53（TAOの測定）
τ	－6265.8
δ_1	－ 57.1
δ_2	－ 0.7（約74km）
UTC（TAO）－LCMAR	4.9μs

この結果，TAOとSHOのロランC受信系の系統差は，4.9－(－0.07)＝5.0μsとなり再び第一回の実験と同じになった．

(3) 第三回時計比較実験　昭和57年6月17日

利用したロランC局　9970M：北西太平洋チェン硫黄島局（LCIwo）

受信点　1，2　東京大学東京天文台・東京三鷹市（TAO）

送受信点間の距離・伝搬時間　LC_{IWO}－TAO　1217.673km　4065.3μs

時刻の設定データ

TD_R	85351.5μs
τ	＋4065.3
δ	＋ 0.4（約60km）
C_0	－ 20.0
TD	89397.2μs ← この数値でUTC（JHD）を設定

時計比較結果

UTC (TAO)−UTC (JHD)　2.2μs

当日の TAO の UTC (TAO)−LC_{IWO}の測定値

UTC (TAO) に対する到来時	4129.9 (TAO の測定)
τ	−4065.3
δ_1	− 57.1
δ_2	− 0.4
UTC (TAO)− LC_{IWO}	7.1μs

TAO と JHD のロラン C 受信系の系統差は7.1−2.2 = 4.9

これで，TAO と JHD のロラン C 受信系の系統差は第一回から第三回まですべて 5 μs と同じ値を示したことになる．

(4) 時計比較結果についての考察

それぞれ，場所，季節，利用局を替えた 3 回の独立した比較結果が同じになったことは，偶然と考えるべきではなく，次のことが指摘できる．

イ．この開発の時刻設定方法が正しく十分信頼できる．

ロ．電波伝搬時間の算出に採用した諸定数，諸式が必要な精度で妥当なものであった．

ハ．電波の伝搬経路に陸上部分が相当含まれる場合，この影響を考慮せずにマイクロ秒の精度を議論することはできない．

ニ．この方法によれば，ロラン C 電波の利用できる任意の場所で，±0.1μs のオーダーの精度で，時計の示す時刻の UTC への設定が可能である．(前項の影響は当然考慮する)

ホ．季節変動は±0.1μs 以下と思われるが，更に周年的な調査が必要である．

ヘ．ロラン C 電波の異った二つの方法による測定結果に生じた偏差 5μs は，ロラン C 搬送波の丁度半サイクルに相当するが，この方法では，受信系の遅延補正を行わないので，こうした誤差の介入する理由がない．

こうした精度の議論については，受信機，受信アンテナ，ロラン C シミュレータ，発射アンテナ等の設置状況，接地方法が影響すると思われるので，これについても種々テストを行った．その結果設置方法の多少の違いや接地ポイントの変更ぐらいでは，S/N が変ることはあっても，時間差の測定値に0.1μs 以上の誤差を生じさせるものではなかった．

7．計算に用いた諸式，諸定数並びに送受信点の測地位置

(1) 測地線の距離 D の算式 (参考文献 1 による)

2 点の測地位置 (φ_1, λ_1), (φ_2, λ_2) を与えて，その間の距離を求めること．

$$\beta = \tan^{-1}(b/a \cdot \tan\varphi) \quad (7.1)$$

$$\chi = \cos^{-1}\{\sin\beta_1 \cdot \sin\beta_2 + \cos\beta_1 \cdot \cos\beta_2 \cdot \cos(\lambda_1 - \lambda_2)\} \quad (7.2)$$

$$\chi' = \chi \cdot \pi/180 \quad (7.3)$$

$$A_0 = (\sin\beta_1 + \sin\beta_2)^2 \quad (7.4)$$

$$B_0 = (\sin\beta_1 - \sin\beta_2)^2 \quad (7.5)$$

$$P = (a-b)(\chi' - \sin\chi)/\{4(1+\cos\chi)\} \quad (7.6)$$

$$Q = (a-b)(\chi' + \sin\chi)/\{4(1-\cos\chi)\} \quad (7.7)$$

$$D = a\chi' - A_0P - B_0Q \quad (7.8)$$

ただし，a：地球の長半径，b：地球の短半径，D：測地線の距離，φ：緯度，λ：経度

これらの値はWGS－72測地系では a = 6378.135km，b = 6356.755km

又，a，bがkmで与えられられれば（7,8）式の単位はkmである．

(2) 電波伝搬時間 τ （時分科会資料78－4，1972）

$$\tau = D/V + \alpha D + \xi + \gamma/D \tag{7.9}$$

V = 0.2996912 (km/μs)，α = 0.002155 (μs/km)，ξ = −0.4076 (μs)，γ = 38.67 (μs·km)

とすれば（7.9）式は μs で求まる．

(3) 方位

測地位置（φ_1，λ_1）から見た測地位置（φ_2，λ_2）の北から東廻りに測った方位Z

$$\theta = \cos^{-1}\{(\sin\varphi_1 - \sin\varphi_2\cdot\cos\chi)/(\sin\chi\cdot\cos\varphi_2)\} \tag{7.10}$$

$$\left.\begin{array}{ll} Z = \theta & \sin(\lambda_1-\lambda_2) \geqq 0 \\ Z = 360-\theta & \sin(\lambda_1-\lambda_2) < 0 \end{array}\right\} \tag{7.11}$$

(4) 送受信点の測地位置 （測地系WGS－72）（参考文献3による）

Table 1 Loan-C Stations

Station	Longitude	Latitude	Emission delay
	° ′ ″	° ′ ″	μs
9970 M (Iwojima)	141 19 30.3 E	24 48 03.6 N	0.0
9970 W (Marcus)	153 58 53.2 E	24 17 07.9 N	15283.94
※7930 M (Marcus)			0.0
9970 X (Hokkaido)	143 43 09.2 E	42 44 37.1 N	36685.12
※7930 X (Hokkaido)			18526.27
9970 Y (Okinawa)	128 08 56.4 E	26 36 25.0 N	59463.18
※7930 Y (Okinawa)			38702.77
9970 Z (Yap)	138 09 55.0 E	9 32 45.8 N	80746.79
※7930 Z (Yap)			56814.78
JHD(Tokyo)	139 45 58.1 E	35 39 53.1 N	
SHO(Simosato)	135 56 11.9 E	33 34 39.1 N	
TAO(Mitaka)	139 32 11.5 E	35 40 31.5 N	

※ Emission moratorium on the Iwojima Station

8．準拠時刻系 UTC（BIH）への整合

この時刻装置は，ロランC発射時に同期又は，これとの関係が正確に求まる装置であって，準拠時刻系との関係が直接求まるものではない．つまり，この方法では，ロランC電波の発射時と準拠時刻系との関係が，別に与えられ，正しく改正されて，初めて準拠時刻系への整合が達せられる．

日本で利用できるロランC北西太平洋チェン硫黄島局（LC IWO）の場合，わが国では，東京大学の東京天文台，郵政省の電波研究所（RRL）が，年間を通してそれぞれの保持するUTC(i)に対して到来時を測定し，電波伝搬時間等所定の改正を行って，発射時を逆算し，定期的にTAOはTime and Latitude BULLETINSに，RRLはSTANDARD FREQUENCY AND TIME SERVICE BULLETINに掲載し公表しているから，この改正を行って，準拠時刻系への整合を果す．

準拠時刻系として現実に利用できるUTCは最も適当であるが，マイクロ秒のオーダーの細かい議論をするとき，注意しなければならないことがある．UTCは一つではなく，細かく見ると各国まちまちであり，一国内においても保持する研究機関ごとに異なり統一されていないからである．したがってUTCは単に〝UTC〟ではなく細かい議論をするときはUTC（TAO），UTC（USNO）のごとく現実に準拠した時刻系を識別しなければならない．

国際協同観測に必要な時刻は，国際報時局（BIH）で決定するUTC（BIH）に準拠すべきものと思われるが，実際に利用した時刻系UTC（i）の時刻のUTC（BIH）への引直しは，BIHが個々のUTC（i）の運搬原子時計又は，ロランC電波等を仲介に実施した相互比較結果をもとに決定した，UTC（BIH）に対するUTC（i）の偏差値を定期的にCircular Dに掲載公表しているからこれを利用する．

さらに，今回開発したロランC時計比較装置と，TAOの従来のそれとの間に5μsの偏差のあることが前記の比較観測から判明した．この差5μsは，この開発の比較原理では受信系の遅延補正を必要としないので，誤差が生じる理由がないから，TAOの発表するロランC発射時は当面何らかの修正を行って使用しなければならない．

別に米国海軍天文台（USNO）は，UTC（USNO）−UTC（LCi）の偏差値をすべてのロランC主局について発表しているから，ロランC電波を参照して時刻合せを行った時計は，これを用いてUTC（BIH）に結びつけることができる．と言えば簡単であるが，現実には，そう簡単ではない．USNO，TAO，RRL等の機関が発表する一つのロランC発射時に対する答がそれぞれ異なるからである．特定のロランC局（硫黄島）の電波を三つの機関が，統一された時刻系に対して測定し，発射時に換算して発表する数値に整合性がないのである．具体例について説明しよう．1981年8月23日に日米間の運搬原子時計による時計比較が実施され，その結果がTAO，RRLよりそれぞれ独立に公表された．これを見るとこの日のUTC（USNO），UTC（TAO），UTC（RRL）相互間の関係はそれぞれ±0.1μsの精度で決定されたと思われる．従って同じ日，それぞれの機関が独立に測定したLC受信値は，所定の補正がほどこされたものはすべて一致しなければならない．しかるに，それぞれの発表値は，

UTC（USNO）−UTC（TAO）＝−5.5μs　（運搬原子時計による測定）
UTC（USNO）−UTC（RRL）＝−5.0μs　（　〃　）
UTC（USNO）−UTC（LCIWO）＝＋2.5μs　（ロランC受信機による測定）
UTC（TAO）−UTC（LCIWO）＝＋2.8μs　（　〃　）
UTC（RRL）−UTC（LCIWO）＝＋1.0μs　（　〃　）

であり，これを図に示すと第5図となり，食い違いがはっきりする．これはおそらくそれぞれの機関が所有するロランC受信器の器差に原因があるものと思われる．つまり現段階では，ロランC硫黄島局の発射時について，各機関が発表するデータは，そのまま利用すると不都合が生じるので，何らかの修正が不可欠であることを示している．

Figure 5 Contradict of Loran-C emited time by Iwojima

そこで当面，硫黄島局の電波を利用して時刻合せを行った時計の示す時刻のUTC(−BIH)への引直しには，TAOの発表値に対しては，−4.0μs，RRL の発表値に対しては−2.7μs，USNOの発表値に対しては−9.2μsの修正がなされなければならない．

根拠は，TAO の−4.0μsは，電波伝搬時間の再計算による修正，陸上伝搬による増分，新らたに判明した半サイクル偏差等を考慮した次の計算結果である．

	旧	新	
TAO−LC$_{Iwo}$ の電波伝搬時間	4066.8μs	4065.3μs	測地系の違いによる差分
全遅延時間	+57.1	+62.1	サイクル改正の追加
陸上伝搬補正（約60km）	+ 0.0	+ 0.5	
	4123.9	4127.9	
差	4.0μs		

RRL，USNO の修正値は，TAO の修正値を前記のように決めたことで第5図の関係から自動的に決めた量である．

TAO と RRL の硫黄島局の発表値の間に1.3μsの系統差があることは，過去のその他のデータからも明らかであるが，この整合がなかなか果せないのは，ロランC受信系の遅延量の検定の難しさを示している．TAO 及び RRL と USNO の硫黄島局の発射時に関する発表値の不整合は，ときには5μsを超える大きなものであるが，その量は，いつも1μsの桁まで一様であるとは限らない．このふらつきは，恐らく採用したロランC受信機の安定度の限界を示すものであろう．

以上，準拠時刻系への整合の方法について述べたが最後に一つのロランC発射時に対する責任ある各機関の発

表値の不整合が一日も早く解消され，発表データの信頼性が保証されることを願う．

9．むすび

時計比較にとって，従来の考え方からすれば，アンテナを含めた受信系全体の信号遅延の補正は必要不可欠のもので遅延量の正確な評価が重要であった．これに対して広く航海用として普及している双曲線航法用受信機では，受信系の信号遅延は原理的に誤差の原因とならないから，設計にあたってこの点に関する考慮は払われていない．従って，常識的に考えればこの種の受信機は時計比較には不向きである．しかし，この開発では比較の考え方に発想の転換があり，時計比較においても，双曲線航法の相対時間差測定原理こそ最も有効な手段であると考えた．受信系の遅延誤差が介入しないと言うことは，信号の遅延量が異なるなどのような受信機を使用しても器差補正をすることなく，同じ電波の測定結果が同じになることであり，従来の時計比較原理よりも理にかなったものと考える．

この開発で採用したロランCシミュレータは，受信機のあらゆる性能テストができるように設計された市販品で，かなり高級なものであるが，時計比較だけが目的であれば，単に擬似信号のみが発生できればよいから手造りの簡単なものでよいだろう．市販のロランC受信機は，電気的知識のほとんどない不特定多数の利用者を対象にして設計されており，利用するシステムの繰り返し周期だけを選定してやれば，あとはスイッチポンで，その受信点に特有の時間差を自動的に測定表示する．しかも最近の受信機では，測定の再現性は驚くほど良い．更に特長をつけ加えると，従来高精度な時計比較は，測地位置の分っている固定点でのみ可能であると考えられていたが，この受信機の採用で受信点が移動中で刻々の測地位置が不明の場合でも，固定点におけると同様の精度で時計比較が可能になった．（この原理については，同じ本報告で題を改めて発表した）

最後に開発にあたって，マネジメントを担当された日立製作所戸塚工場の前田和雄氏，個々の構成装置の製作にあたって，筆者の設計思想に理解を示され，装置の改良，設計製作を行った光電製作所の関係者，国際電子工業㈱の関係者，特に小長谷氏，製作した装置の機能，精度等の検定のために実施した時計比較にあたり協力を惜しまなかった東京天文台の藤原清，藤本真克の両氏に深く感謝する．

参 考 文 献

B.I.H., 1981：*Circular D 179*

Charles Kirkland, 1964, Loran Coordinate Computation, *Informal manuscript report* No. N-1-64
Marine Sciences Department U.S. Naval Oceanographic Office

Coast Guard 1980：*Radionavigation Systems* PP. 30～37 Department of Transportation

光電製作所　1981：ロラン受信機 LR-707D 取扱説明書

光電製作所　1981：ロランCシミュレータ LRS-128 取扱説明書

小野房吉　1980：航海用ロランC受信器による時計比較装置，昭和55年経緯度研究会集録．86－90ページ

小野房吉　1980：ロランC電波による時刻及び周波数の比較，電波航法，第26号 3－12ページ

Radio Research Laboratory, 1981：*Standard Frequncy and Time Service Bulletin, Annual Report*

Tokyo Astromical Observatory, 1981：*Time and Latitude Bulletins,* Vol. 55, No. 3.